

2H11 医療用炭素線を活用した地上機器向け中性子起因 ソフトウェア評価手法

○中島隆一, 杉谷昇太郎, 杉崎春斗, 伊藤貴史, 万代周平 (京都工芸繊維大学),
古田潤 (岡山県立大学), 小林和淑 (京都工芸繊維大学), 酒井真理 (群馬大学)

Soft Error Evaluation for Terrestrial Application Using Clinical Carbon Beams

Ryuichi Nakajima, Shotaro Sugitani, Haruto Sugisaki, Takafumi Ito, Shuhei Mandai (Kyoto Institute of Technology), Jun Furuta (Okayama Prefectural University), Kazutoshi Kobayashi (Kyoto Institute of Technology), and Makoto Sakai (Gunma University)

Key Words: soft-error, Single Event Upset (SEU), Single Event Transient (SET), neutron, clinical carbon beam, flip-flop, Monte Carlo simulation, particle and heavy ion transport code system (PHITS)

Abstract

We propose a method to evaluate the soft error rate (SER) of semiconductor chips used in terrestrial systems by utilizing a clinical carbon beam facility. Neutrons are generated by irradiating acrylic with a carbon beam, and the resulting neutrons are used to irradiate the target chip, while high-LET charged particles are blocked by lead. The SER obtained with this method generally agrees with the results measured using a conventional white neutron source, suggesting that the method could serve as a practical alternative.

1. 研究背景および目的

集積回路の微細化に伴い、信頼性の低下が問題となっている^{1, 2, 3}。特に、中性子によるソフトウェアは、地上用途の集積回路における重要な信頼性問題の一つである。ソフトウェアには、放射線の突入により発生する一時的な電圧変動である SET (Single Event Transient) と、記憶素子内で生じた SET パルスにより保持値が反転する SEU (Single Event Upset) が含まれる。ソフトウェア率 (SER) の評価には、実環境でのフィールド試験または中性子源を用いた加速試験が必要である。加速試験では、地上の中性子スペクトルに類似した白色中性子 (WN) 源を用いるのが一般的であるが、JESD89B⁴) で推奨される WN 照射施設は世界に 4 箇所しかなく、ビーム時間の確保が困難である。代替手法として、低エネルギー中性子源やシミュレーションの活用が提案されている^{5, 6}) が、中性子専用の照射施設が必要である。本研究では、中性子以外の照射施設として粒子線治療施設に着目した。粒子線治療施設はがん治療に用いられ、世界中で多数の加速器施設が稼働または建設中である⁷)。医療用陽子線による SER 評価は報告されている⁸)。陽子線は 50 MeV を超えると中性子と類似の核反応を示すため、直接照射が可能である⁴⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹)。一方、医療用炭素線では中性子を別途生成する必要があり、炭素線を用いた中性子起因 SER 評価は報告されていない。

本稿では、医療用炭素線を用いた地上デバイスのソフトウェア評価手法を提案する¹²)。65 nm バルクプロセスの回路を用いて、JESD89B で推奨される大阪大学核物理研究センター (RCNP)¹³) での WN 照射との比較を行った。炭素線をアクリルブロックに照射して中性子を生成し、同時に生成された荷電粒子は鉛ブロックで遮蔽した。医療用炭素線施設で得られた結果は RCNP での結果とよく一致した。

2. 提案手法

本手法の要点は以下の 3 点である。

- 1) 中性子生成：アクリルに炭素線を照射して中性子を生成。
- 2) 荷電粒子除去：鉛ブロックにより荷電粒子を遮蔽。
- 3) ソフトエラー評価：生成した中性子を測定対象に照射。加速係数は粒子輸送シミュレーションコード PHITS¹⁴) により算出。

2.1. 中性子の生成および荷電粒子の除去方法

医療用炭素線施設では、RCNP と同様に、ターゲットに荷電粒子ビームを照射することで中性子を生成する。表 1 に、RCNP と炭素線施設における中性子生成方法と荷電粒子除去方法の比較を示す。炭素線がアクリルブロックに照射されると、ブラッグピーク付近で中性子等の二次粒子が多く発生する¹⁵)。ア

表 1 各施設における中性子生成および荷電粒子除去方法。

| 照射施設 | RCNP | 炭素線照射施設 |
|-----------|-------------|---------|
| 核種 | 陽子 | 炭素 |
| ターゲット | タンガステン | アクリル |
| 荷電粒子の除去方法 | クリアリングマグネット | 鉛 |

表 2 GHMC のビーム条件。ビーム強度は、照射サイクルで平均された値。

| | |
|--------|---|
| エネルギー | 279 MeV/u 炭素イオン |
| プロファイル | ガウス分布をもつペンシルビーム ($\sigma = 11$ mm). |
| 強度 | 1×10^9 particles per sec (pps) |
| 照射サイクル | 約 3 秒周期で 1 秒間の照射 |

クリルブロックの使用は、半減期が長い重イオンの生成を防ぎ、治療室の放射化を低減することを目的としている。アクリルで発生する二次粒子は、中性子、陽子、アルファ粒子が大部分を占める。治療室にクリアリングマグネットを設置するのは難しいため、荷電粒子の除去には鉛ブロックを用いる。測定対象に照射する粒子のエネルギースペクトルは、PHITS 等のシミュレーションにより評価する。

2.2. GHMC におけるビーム条件と炭素線のエネルギー測定

炭素線照射試験は、群馬大学重粒子医学センター (GHMC) ¹⁶⁾ で実施した。GHMC におけるビーム条件を表 2 に示す。炭素線はシンクロトロンから 290 MeV/u で出射されるが、大気等の通過によりエネルギーを失う。治療室における炭素線のエネルギーは、アクリルブロック内におけるブラッグピーク位置を決定するため、正確な値が必要である。ピーク位置のずれは、生成される二次粒子の数に影響する。治療室におけるビームエネルギーは、水槽を用いた測定により決定した。水槽を用いて水の厚みを変化させながらビームを照射し、深さ方向の線量分布を測定することで飛程を測定した。測定のセットアップと結果をそれぞれ図 1, 2 に示す。水中飛程は約 152.1 mm であり、PHITS のシミュレーション結果からビームエネルギーは約 279 MeV/u に相当する。

2.3. 発生した中性子を利用した測定手法

測定セットアップおよび PHITS で使用した体系を、それぞれ図 3, 4 に示す。測定対象はアクリルブロックの 31 cm 下に設置した。ビーム下流側には高速中性子が多く存在しており、測定時間の短縮が可能となる ¹⁷⁾。アクリルブロックと測定対象の間に 8 cm の鉛ブロックを設置し、荷電粒子を遮蔽した。

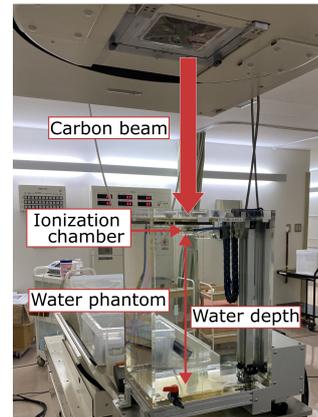


図 1 水中飛程の測定系。電離箱を上下に動かしてピーク位置を特定する。

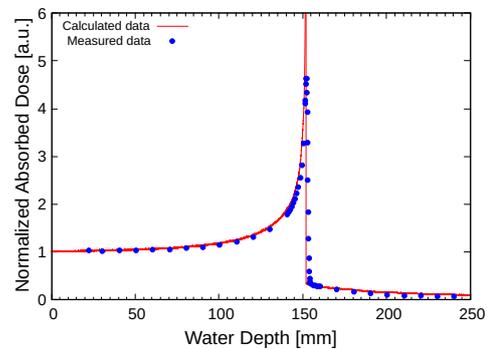


図 2 水中飛程の測定値およびシミュレーション結果。ピーク位置は約 152.1 mm。

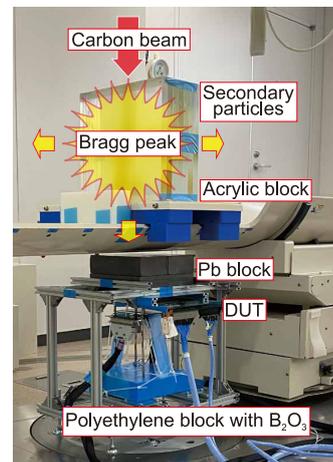


図 3 GHMC でのソフトエラー測定セットアップ (DUT: 測定対象) ¹²⁾。

鉛ブロックの有無によるアルファ粒子と中性子の空間分布の変化を図 5, 6 に示す。鉛ブロックにより荷電粒子のスペクトルは減少する。特に、アルファ粒子は 99% 以上遮蔽されるが、中性子数の減少は 16% 程度にとどまる。

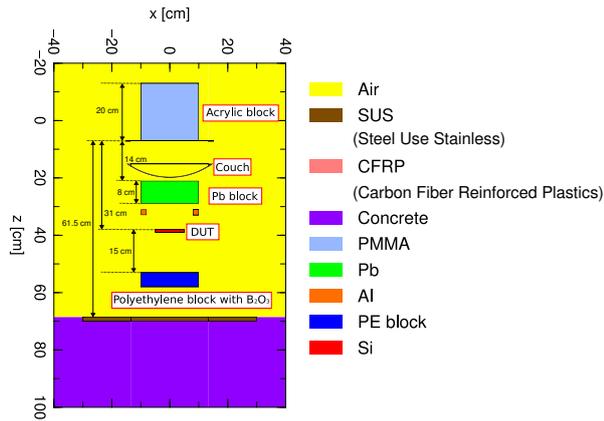


図4 PHITSで使用した体系. DUTと書かれた赤いブロックが測定対象¹²⁾.

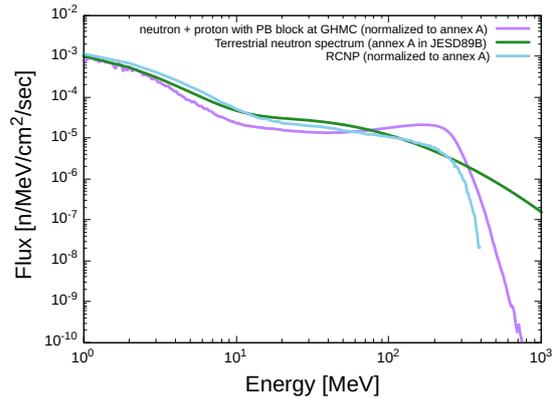


図7 GHMC, RCNP, 地上環境における中性子のエネルギースペクトル. 地上環境の中性子スペクトルは⁴⁾で定義されている. GHMCはRCNPと比較して100 MeV以上の中性子が多い.

表3 中性子に対する平均加速係数 F_{acc} . GHMCの F_{acc} は, 10 MeV 以上の中性子数と 50 MeV 以上の陽子数から算出した. 括弧内の値は照射口からの距離を示す.

| | GHMC | RCNP (0 m) | RCNP (2 m) |
|-----------|--------------------|--------------------|--------------------|
| F_{acc} | 4.37×10^8 | 1.75×10^8 | 1.18×10^8 |

3. GHMCとRCNPでの照射実験

3.1. 実験条件

3.1.1. エネルギースペクトルと加速係数

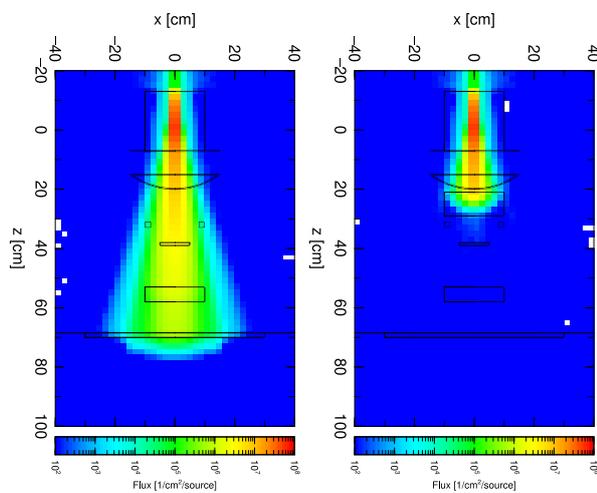
GHMCおよびRCNPにおける中性子と陽子のエネルギースペクトルを図7, 加速係数を表3に示す.

加速係数について, RCNPは実測, GHMCは10 MeV以上の中性子と50 MeV以上の陽子数に基づき, PHITSにより算出した. GHMCは, 加速係数がRCNPに比べて約2.5倍大きいため, 照射時間を短縮できる. GHMCでは照射中に炭素線フラックスを測定しておらず, 加速係数は, 施設の公称値 1×10^9 ppsを使って算出した.

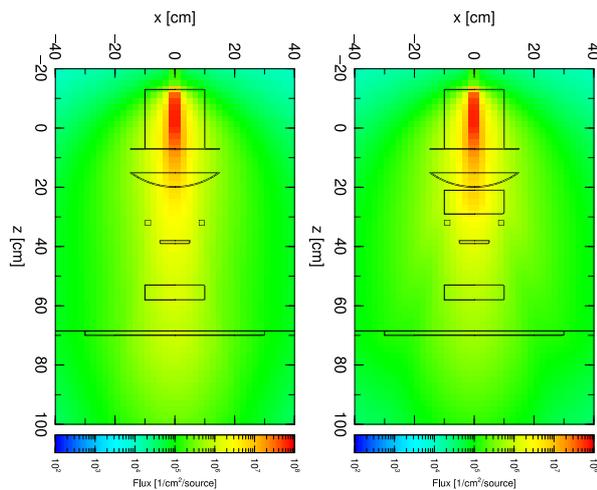
3.1.2. SEU測定

測定対象として, 65 nm パルクプロセスで製造された6種類のフリップフロップ (FF) を用いた. 6種類のうち, 5種類は標準タイプ (図8) を含む非冗長化FF, 残り1種類は図9に示す冗長化FFである. 測定は, $(Q, CLK) = (0, 0), (0, 1), (1, 1), (1, 0)$ の4条件下で実施した. 手順を以下に示す.

- 1) 全てのFFに同じ値 (0 または 1) を書込.



(a) 鉛なし. (b) 鉛あり.
図5 アルファ粒子の空間分布 (> 10 MeV).



(a) 鉛なし. (b) 鉛あり.
図6 中性子の空間分布 (> 10 MeV).

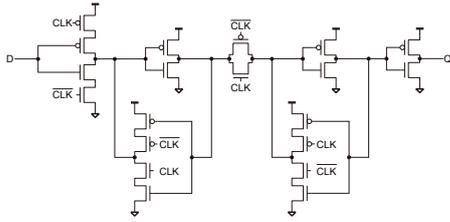


図 8 TGFF.

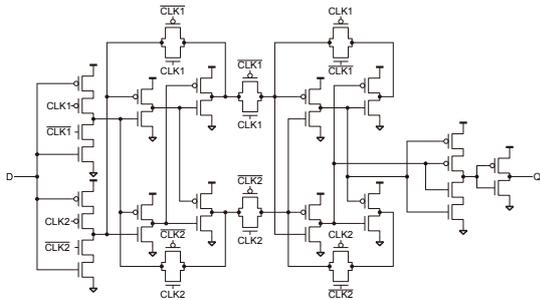


図 9 Dual interlocked storage cell flip flop (DIC-EFF) 18).

- 2) CLK 信号を 0 または 1 に固定.
- 3) 照射後, 保持値を讀出.
- 4) 讀み出した値と期待値が異なる数をエラー数として記録.

SEU rate は FIT (Failure In Time) を用いて表す. FIT とは 10^9 時間あたりに発生するエラー数であり, SEU rate は式 1 で算出した.

$$SEU\ rate\ [FIT/Mbit] = \frac{N_{error} \times 10^9 \times 1024^2}{N_{FF} \times F_{acc} \times t\ [hour]}, \quad (1)$$

ここで, N_{error} はエラー数, N_{FF} は FF 数, t は照射時間を表す.

3.1.3. SET 測定

65 nm バルクプロセスで製造された SET パルス幅測定回路を用いて, NMOS トランジスタで発生するパルス幅の分布を測定した. SET ターゲットは, PMOS が常時 ON, NMOS が常時 OFF 状態のインバータであり, NMOS 側でのみ SET パルスが発生する. 測定回路は分解能 35 ps の Time-to-Digital Converter (TDC) を搭載している. TDC はスキャン型 FF で構成されており, モード変更によりシフトレジスタとして動作する. そのため, SET 測定手順は SEU 測定とほぼ同一である. SET rate は式 2 で算出した.

$$SET\ rate\ [FIT/target] = \frac{N_{error} \times 10^9}{N_{target} \times F_{acc} \times t\ [hour]}, \quad (2)$$

ここで, N_{target} は SET ターゲットの数を表す.

3.2. 実験結果

RCNP と GHMC で測定した 6 種類の FF の SEU rate を図 10 に示す. RCNP と GHMC で得られた SEU rate の相関係数は 0.98 であり, (Q, CLK) 依存性も概ね一致した.

図 11 に RCNP と GHMC の SEU rate の比較を示す. 両者の関係は式 3 で表される.

$$SEU_{GHMC} = 1.01 \times SEU_{RCNP}. \quad (3)$$

SEU_{GHMC} と SEU_{RCNP} の差は約 1% 程度に留まった. この差は, GHMC のモニター線量計によるフルエンス測定の不確かさ (数%) の範囲内である. この結果は, 中性子スペクトルの違いが 65 nm FF の SEU に与える影響が小さいことを示している.

SET の測定結果を図 12 に示す. GHMC および RCNP 両施設において, 280 ps のパルスが最も多く観測された. 図 13 に, 特定のパルス幅を超える SET rate とその近似曲線を示す. 245 ps を超える範囲では, 両施設の SET rate は概ね一致した. 一方, 245 ps 以下の範囲では, RCNP での SET rate が GHMC より約 20% 高かった. この差は, 1–10 MeV の中エネルギー中性子の影響によるものと考えられる. 表 4 に, RCNP, 地上, GHMC における中性子のエネルギー別割合を示す. RCNP では, 中エネルギー中性子の割合が GHMC より高い. その結果, RCNP では GHMC より 245 ps 以下のパルスが多く発生したと考えられる.

一方, SEU rate には有意な差は観測されなかった. このことは, 中エネルギー中性子が 65 nm FF の SEU を引き起こしにくいことを示唆している. したがって, 中エネルギー中性子の影響が無視できる条件下では, 医療用炭素線は WN ビームの代替手法として有効であると考えられる.

4. まとめ

本研究では, 医療用炭素線施設を用いた集積回路の中性子起因ソフトエラー耐性評価手法を提案した. アクリルへ炭素線を照射して中性子を生成し, 鉛で荷電粒子を遮蔽した. RCNP との比較では, SEU 率および SET パルス幅の分布傾向が概ね一致した. RCNP では中エネルギー中性子によって 245 ps 以下のパルスが GHMC より多く観測されたが, SEU 率への影響は見られなかった. 今後は, 微細プロセスにおける中エネルギー中性子の影響も考慮した評価手法の確立が課題となる.

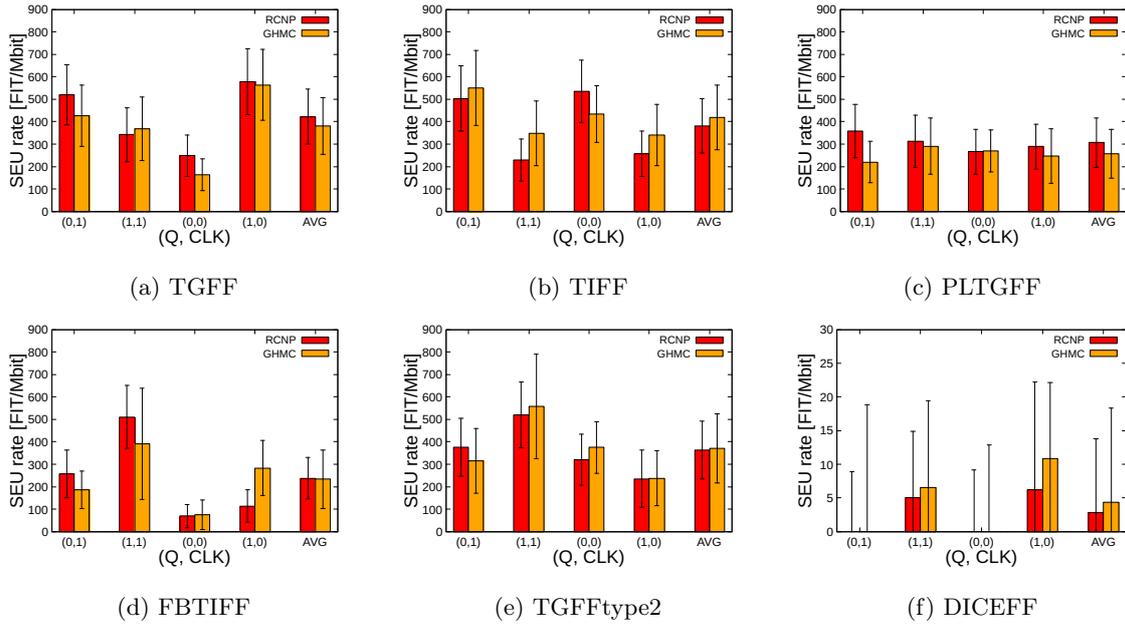


図 10 RCNP および GHMC における 6 種類の FF の測定結果. エラーバーは 95%信頼区間を示す.

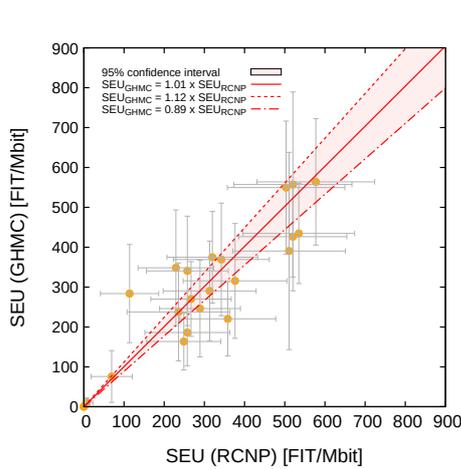


図 11 RCNP と GHMC における SEU の比較. 赤線は SEU_{RCNP} と SEU_{GHMC} の関係を示す近似直線である. 薄赤色の領域は近似直線の 95%信頼区間である.

表 4 GHMC, RCNP, 地上環境における 1-10 MeV および 10 MeV 以上の中性子比.

| Energy Range | NYC ⁽¹⁹⁾ | GHMC | RCNP |
|--------------|---------------------|------|------|
| 1 - 10 MeV | 36% | 24% | 57% |
| 10 + MeV | 64% | 76% | 43% |

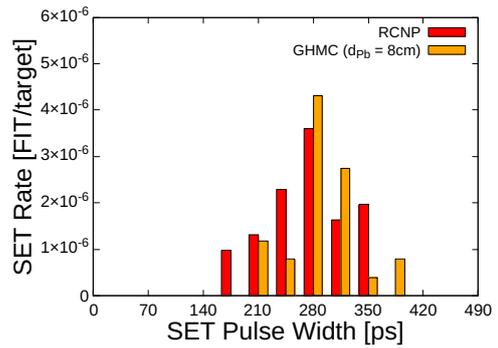


図 12 RCNP および GHMC における SET パルス幅の分布.

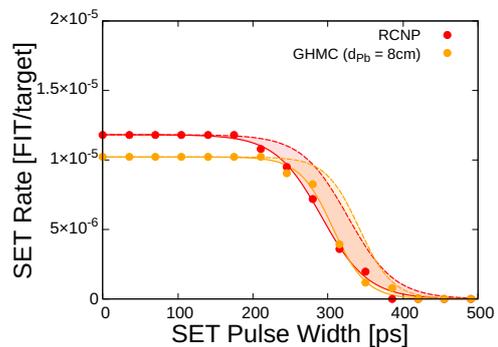


図 13 RCNP および GHMC における, 特定のパルス幅以上の SET 発生率とその近似曲線. 網掛け部分は測定回路における TDC の分解能 (35 ps) を考慮した領域である.

参考文献

- 1) R. Baumann, "The impact of technology scaling on soft error rate performance and limits to the efficacy of error correction," in *Dig. IEEE Int. Electron Devices Meet. (IEDM)*, San Francisco, CA, USA, 2002, pp. 329–332.
- 2) A. Makihara et al., "Optimization for SEU/SET immunity on 0.15 μm fully depleted CMOS/SOI digital logic devices," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 53, no. 6, pp. 3422–3427, Dec. 2006.
- 3) V. Srinivasan et al., "Single-event mitigation in combinational logic using targeted data path hardening," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 52, no. 6, pp. 2516–2523, Dec. 2005.
- 4) "Measurement and reporting of alpha particle and terrestrial cosmic ray-induced soft errors in semiconductor devices," in *JEDEC SOLID STATE TECHNOLOGY ASSOCIATION*, Oct. 2006.
- 5) T. Uezono et al., "Evaluation technique for soft-error rate in terrestrial environment utilizing low-energy neutron irradiation," in *Proc. 2016 IEEE 25th Asian Test Symp. (ATS)*, Hiroshima, Japan, 2016, pp. 293–297.
- 6) S. Abe et al., "A terrestrial ser estimation methodology based on simulation coupled with one-time neutron irradiation testing," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 70, no. 8, pp. 1652–1657, Aug. 2023.
- 7) Y. Matsumoto et al., "A critical review of radiation therapy: From particle beam therapy (proton, carbon, and BNCT) to beyond," *J. Pers. Med.*, vol. 11, no. 8, Aug. 2021, Art. no. 825.
- 8) Y. Chiang et al., "Investigate the equivalence of neutrons and protons in single event effects testing: A geant4 study," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 9, May 2020, Art. no. 3234.
- 9) J. Baggio et al., "Analysis of proton/neutron SEU sensitivity of commercial SRAMs-application to the terrestrial environment test method," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no. 6, pp. 3420–3426, Dec. 2004.
- 10) E. Normand, "Extensions of the burst generation rate method for wider application to proton/neutron-induced single event effects," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 45, no. 6, pp. 2904–2914, Dec. 1998.
- 11) C. Dyer et al., "An experimental study of single-event effects induced in commercial SRAMs by neutrons and protons from thermal energies to 500 MeV," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 51, no. 5, pp. 2817–2824, Oct. 2004.
- 12) R. Nakajima et al., "An approach to neutron-induced SER evaluation using a clinical 290 MeV/u carbon beam and particle transport simulations," in *Proc. 2024 IEEE Int. Rel. Phys. Symp. (IRPS)*, Grapevine, TX, USA, 2024, pp. 632–635.
- 13) C. W. Slayman, "Theoretical correlation of broad spectrum neutron sources for accelerated soft error testing," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 57, no. 6, pp. 3163–3168, Dec. 2010.
- 14) T. Sato et al., "Recent improvements of the particle and heavy ion transport code system – PHITS version 3.33," *J. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 61, no. 1, pp. 127–135, Jan. 2024.
- 15) M. Sakai et al., "Soft error measurement for carbon ion radiotherapy," *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B*, vol. 553, Aug. 2024, Art. no. 165384.
- 16) T. Ohno et al., "Carbon ion radiotherapy at the gunma university heavy ion medical center: New facility set-up," *Cancers*, vol. 3, no. 4, pp. 4046–4060, Oct. 2011.
- 17) Y. Kawakami et al., "The contribution of secondary particles following carbon ion radiotherapy to soft errors in CIEDs," *IEEE Open J. Eng. Med. Biol.*, vol. 5, pp. 157–162, Jan. 2024.
- 18) F. Mori et al., "Intrinsic vulnerability to soft errors and a mitigation technique by layout optimization on DICE flip flops in a 65-nm bulk process," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 68, no. 8, pp. 1727–1735, Aug. 2021.
- 19) H. Quinn et al., "The effect of 1–10-MeV neutrons on the JESD89 test standard," *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, vol. 66, no. 1, pp. 140–147, Jan. 2019.